

Windkraftanlagen

Ihre Errichtung und ihre Wirkung auf den Menschen und auf höher entwickelte Meeressäuger

Quellen für klimafreundliche und erneuerbare Energie sind heute, allein schon infolge der weltpolitischen Ereignisse, so bedeutungsvoll wie nie zuvor. Begriffe wie Energiewende, Wind- und Solarenergie oder Fotovoltaik sind vielerorts im Gespräch. Dieser Beitrag befasst sich konkret mit Anlagen, die von der Kraft des Windes angetrieben werden, d. h. mit Windkraftanlagen.

Autor des Beitrags: Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit



Windkraftanlagen

Anlagen dieser Art gibt es sowohl auf dem Festland als auch im Meer, Letztere insbesondere dort, wo es besonders viel Wind gibt. Vor unseren Küsten ist das die Nordsee.

Die nachfolgenden Ausführungen befassen sich mit den Folgen,

- die auf dem Festland (Onshore) installierte Windkraftanlagen in unserem Gehör hinterlassen und

- die beim Rammen von Offshore-Pfählen in den Meeresboden bei den dortigen Lebewesen zurückbleiben.

Mit anderen Worten, es geht zum einen um etwaige Schäden, die der von den Rotorblättern ausgehende Infraschall [1], [2] in unserem Gehör hinterlässt, und zum anderen um die Wirkung auf höher entwickelte Lebewesen als Folge der Montage von Offshore-Pfählen.

Wirkungen auf unser Gehör sowie auf unser allgemeines Wohlbefinden infolge des von Windkraftanlagen erzeugten Infraschalls

Windkraftanlagen bestehen generell aus einem Fundament, dem darauf stehenden Turm und oben schließlich der Maschinengondel mit Generator und dem Rotor. Letzterer besteht seinerseits im Allgemeinen aus drei Rotorblättern (Bild 1). Die Rotorblätter sind fast immer um ihre eigene Achse drehbar, je nach Bedarf. Bei jeder Umdrehung des Rotors passieren die Rotorblätter nacheinander den Turm. Dabei entsteht ein ausgeprägter Schallimpuls. Bei den üblichen Drehzahlen geschieht das mit einer Frequenz von etwa 1,5 Hz, und das ist Infraschall.

Warum es ausgerechnet nur drei Rotorblätter sind, und nicht mehr, dafür gibt es zwei Gründe. Der eine betrifft die Kosten, d. h. die Wirtschaftlichkeit der Anlage, und der andere hat etwas mit der Materialbelastung zu tun. Mit anderen Worten: Jedes zusätzliche Rotorblatt mit einer Länge von 70 m und mehr bedeutet erhebliche Mehrkosten und zudem käme auch noch das Unwuchtverhalten hinzu, was die gesamte Statik der Windkraftanlage beeinträchtigen würde. Das Dreierblatt hat sich somit als optimal erwiesen, und es läuft außerdem auch noch runder.

Zurück zur Akustik: Für die Messung des von Windkraftanlagen erzeugten Infraschalls verwendet man, genauso wie bei allen anderen akustischen Messungen auch, Messmikrofone, nur dass sie in diesem Fall bis in den tieffrequenten Bereich hinunter verwendbar sein müssen. Zwei Beispiele für derartige Mikrofone sind in (Bild 2) dargestellt. Man kann so eine Messung natürlich auch mit nur einem Messmikrofon durchführen. Aussagekräftigere Ergebnisse bekommt man aber mit einem Messaufbau, wie er in Bild 3 zu sehen ist. Diese Darstellung zeigt eine Anordnung zur Messung von Windkraftanlagen im Freien nach einem Vorschlag von Betke und Remmers [3]. Um keinen „Pseudoschall“ von den beiden umströmten Mikrofonen mit aufzunehmen, sind hier die beiden Messmikrofone vertieft unterhalb der Erdoberfläche platziert. Normale Windschirme sind bei Infraschall unwirksam. Die Mikrofone A und B sind hier in einem Abstand von etwa 10 m angeordnet. Die von den beiden Mikrofonen abgegebenen Zeitsignale a(t) und b(t) – z. B. Schalldruckwerte – können nachfolgend per FFT in den Frequenzbe-



Bild 1: Beispiel für eine Windkraftanlage. Solche Anlagen bestehen im Prinzip aus vier Bauelementen, von unten nach oben: dem Fundament, dem Turm, der Maschinengondel und dem meist dreiflügeligen Rotor (auch: Windrad). Bei jeder Umdrehung passieren die meist drehbaren Rotorblätter nacheinander den Turm und erzeugen dabei jeweils einen impulsartigen Schall. Bei drei Rotorblättern und den üblichen Drehzahlen ergibt das eine ausgeprägte Impulsspitze bei ungefähr 1,5 Hz, und somit ist das Infraschall.



Bild 2 links: 1-Zoll-Messmikrofon-Kapsel Typ MK 112 von Microtech Gefell GmbH, Messfrequenzbereich: 10 Hz–20 kHz, Leerlauf-Übertragungsfaktor: $T_E = 50 \text{ mV/Pa}$, Übertragungsmaß: $G_E = -26 \text{ dB}$ (re 1V/Pa), Kapseldurchmesser: 23,77 mm
Bild 2 rechts: 1/8-Zoll-Messmikrofon-Kapsel, Typ 4138 von Brüel & Kjær, Messfrequenzbereich: 6,5 Hz–40 kHz, Leerlauf-Übertragungsfaktor: $T_E = 1 \text{ mV/Pa}$, Kapseldurchmesser: 3,5 mm, Grenzschalldruckpegel: 168 dB

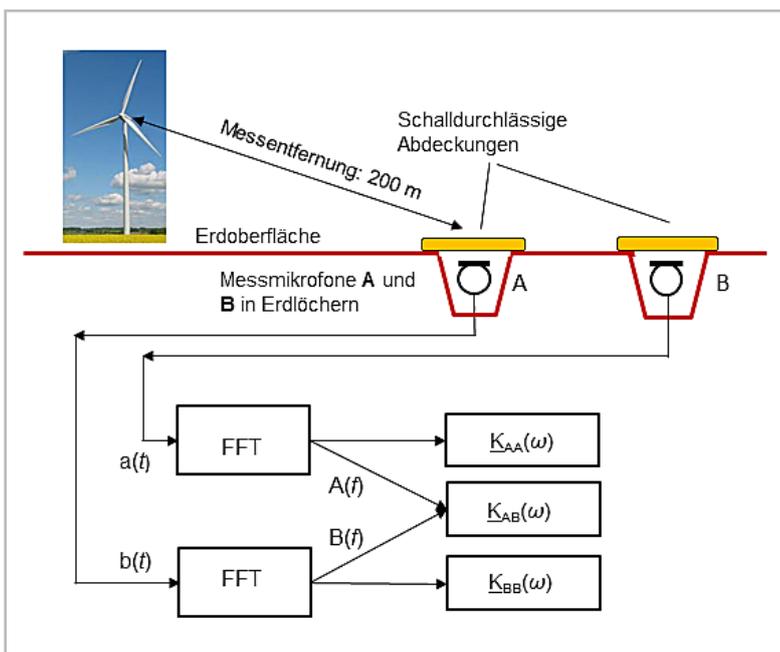


Bild 3: Messung des von Windkraftanlagen ausgehenden (Infra-)Schalls im Freien mithilfe von zwei Messmikrofonen, nach einem Vorschlag von Betke und Remmers [3]. Um keinen „Pseudoschall“ von den beiden umströmten Mikrofonen aufzunehmen, kann man die Messmikrofone unterhalb der Erdoberfläche platzieren. Normale Windschirme sind bei Infraschall unwirksam. Die beiden Mikrofone sollten einen Abstand von mindestens 10 m voneinander haben. Die von ihnen abgegebenen Zeitsignale a(t) und b(t) werden per FFT in den Frequenzbereich umgewandelt, um so aus ihnen die dazugehörigen Autospektren A(f) und B(f) zu gewinnen.

reich umgewandelt werden, woraus man ferner die entsprechenden spektralen Autoleistungsdichten $K_{AA}(\omega)$ und $K_{BB}(\omega)$ sowie die spektrale Kreuz-Leistungsdichte $K_{AB}(\omega)$ für weitere Analysen gewinnen kann.

Aus anderen Untersuchungen kennen wir heute eine Reihe von Reaktionen unseres Körpers bei verschiedenen Infraschallpegeln oberhalb von 140 bis 155 dB. Das sind z. B.

- Gleichgewichtsstörungen, Übelkeit
- Ermüdung und Benommenheit
- Abnahme der Konzentrationsfähigkeit
- Atembeschwerden
- Veränderungen des Nystagmus
- Tinnitus
- Verlängerung der Reaktionszeit
- Anstieg des diastolischen Blutdrucks
- Veränderung der Pulsfrequenz

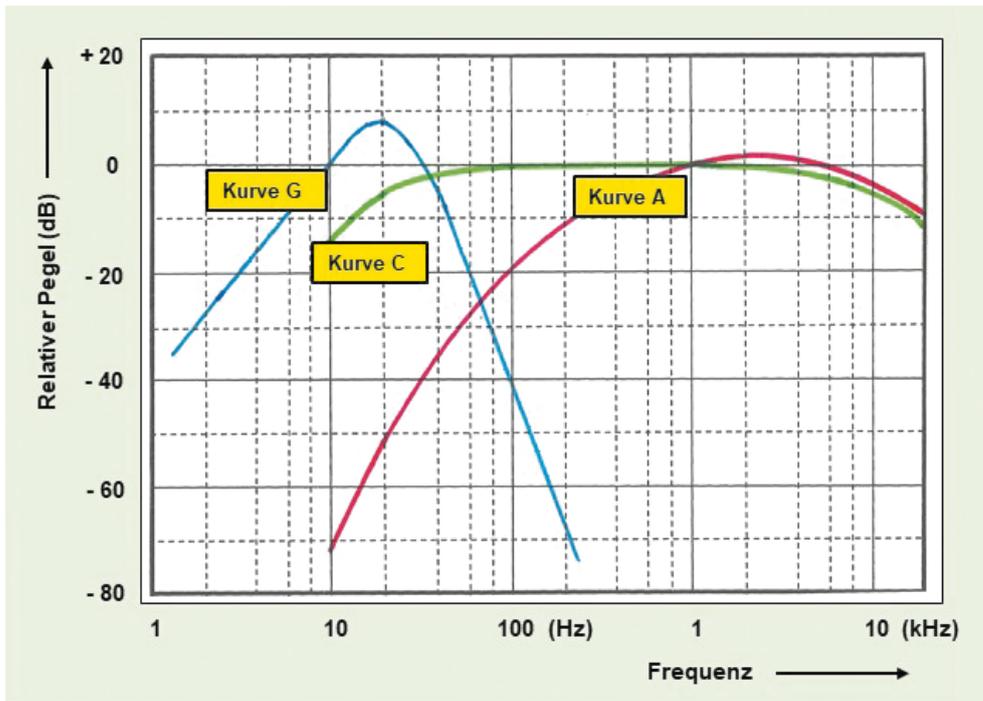


Bild 4: Bewertungscurven A und C für Schallmessungen im hörbaren Frequenzbereich, Bewertungskurve G für Schallmessungen im Infrasschallbereich (nach: ISO 7196)

Neben den hier genannten Einflüssen von Infrasschall auf unser Wohlbefinden ist des Weiteren bekannt, dass viele unserer Körperorgane mechanische Eigenfrequenzen (oder Resonanzfrequenzen [2]) besitzen, die alle im Infrasschallbereich liegen, z. B.:

- Gleichgewichtsorgan: 0,5 bis 1,3 Hz
- Magen: 2 bis 3 Hz
- Bauch: 2 bis 4 Hz
- Herz: 4 bis 6 Hz (Kontraktionsfrequenz 1 bis 1,5 Hz)
- Wirbelsäule: 4 bis 6 Hz
- Nieren: 6 bis 8 Hz
- Gesamter menschlicher Körper: 4 bis 5 Hz

Die Gefährdungsbereiche bei Infrasschallexpositionen (nach Borgmann [4]) liegen bei Pegeln von

- > 170 dB: Lebensgefahr
- > 160 dB: sehr gefährlich

- > 160 dB: deutliche Reaktionen
- > 140 dB (bei 0,125 Hz): keine eindeutigen Reaktionen
- > 120 dB (bei 32 Hz): keine eindeutigen Reaktionen

Für Messungen und Bewertungen von Schall im Hörfrequenzbereich gibt es Bewertungskuren (z. B. A und C) und auch für den Infrasschallbereich gibt es eine Bewertungskurve G (Bild 4).

Interessant ist auch der verlängerte Verlauf der Hörschwellenkurve in Richtung des Infrasschallbereichs (Bild 5).

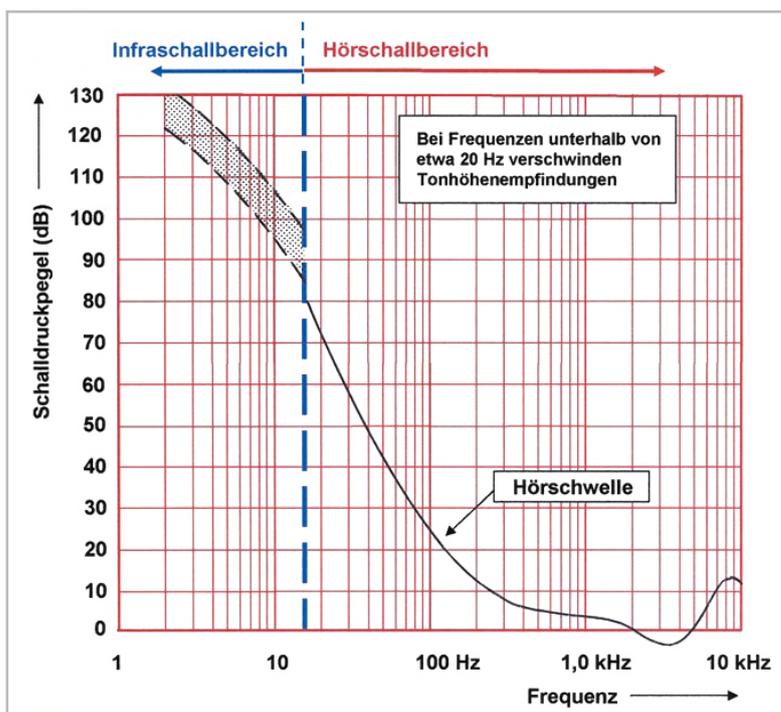


Bild 5: Infrasschall-Wahrnehmungsschwelle und -Hörschwelle (nach ISO R 226) für Luftschall. Die Wahrnehmungsschwelle für Infrasschall ist hier als Toleranzband dargestellt.

Windkraftanlagen im Meer und die Wirkung von Rammarbeiten beim Einsetzen der Offshore-Pfähle auf die höher entwickelten Lebewesen im Meer

Mit einer völlig anderen Art der Schallerzeugung, aber auch Schallausbreitung hat man es bei Rammarbeiten im Meer zu tun, und zwar bei der Einbringung von Pfählen für die Offshore-Windkraftanlagen. Die dabei entstehenden tieffrequenten Schallanteile breiten sich infolge der extrem niedrigen Dämpfung des Meerwassers über sehr große Entfernungen aus. Schon bei etwa 100 Hz hat dort die Schalldämpfung den winzig kleinen Wert von nur 10^{-3} dB/km, und bei 10 Hz sind es sogar nur noch 10^{-5} dB/km (Bild 6). Hinzu kommt noch die Tatsache, dass im Meer in küstennahen Gebieten – und nur dort stehen Offshore-Anlagen – bedingt durch die extrem unterschiedlich großen Schallkennimpedanzen Z_0 von Luft und Wasser eine Totalreflexion des Schalls an der Meeresoberfläche erfolgt (Bild 7). Nur zur Erinnerung: Die Schallkennimpedanz Z_0 ergibt sich aus dem Produkt von Schallgeschwindigkeit c und Dichte ρ des Mediums ($Z_0 = \rho \times c$). Früher bezeichnete man diese Größe auch als Wellenwiderstand. Für Wasser hat Z_0 einen Wert von $1,44 \times 10^6$ Ns/m³, während der Wert für Luft nur 408 Ns/m³ beträgt. Mit anderen Worten: Unterhalb der Meeresoberfläche herrscht somit ein quasi-diffuses Schallfeld.

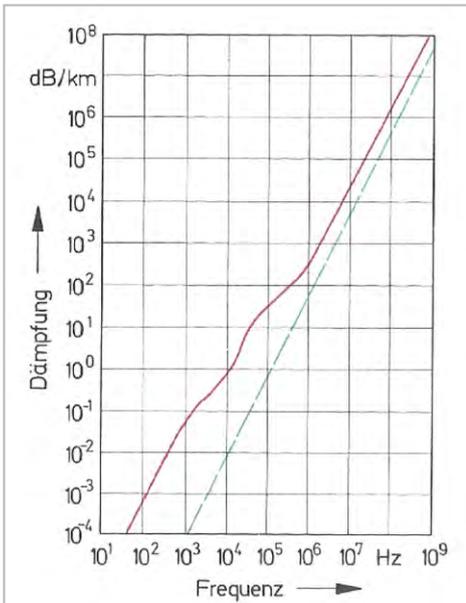


Bild 6: Schallabsorption oder -dämpfung in dB pro km im Meerwasser in Abhängigkeit von der Frequenz. Die blau gestrichelte Linie kennzeichnet die klassische Absorption, die nur durch Reibung zustande kommt. Die rot durchgezogene Kurve weist außer auf Reibungsverluste auch auf zusätzliche molekulare Umlagerungen in der Ionenstruktur des Wassers hin.

Für Schallmessungen im Wasser benutzt man Hydrofone und Wasserschallmikrofone (Bild 8). Bedingt durch die Unterschiede zwischen Wasserschall und Luftschall - kleine Auslenkungen, aber große Kräfte - haben Hydrofone keine Membran, sondern Festkörper (Piezokeramik, früher Quarz) als Wandlerelemente. Die von ihnen abgegebenen elektrischen Signale können nachfolgend entweder einem Spannungsverstärker oder einem Ladungs-

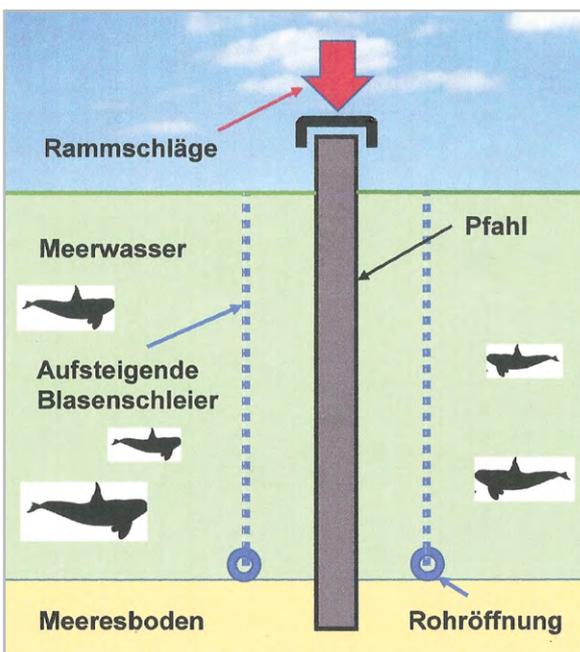


Bild 9: Erzeugung eines nach oben aufsteigenden Blasenschleiers, der den in den Meeresboden einzurammenden Offshore-Pfahl konzentrisch umgibt. Dazu wird durch Rohre, die zum Meeresboden hin verlegt sind, Luft gepumpt, die unten austritt und wie ein Luftblasenvorhang nach oben aufsteigt. Dieser Vorhang hat eine stark lärm-dämmende Wirkung. Auf diese Weise kann die Unterwasserwelt mit ihren Lebewesen gegenüber schädlichem Lärm abgeschirmt und somit geschützt werden.

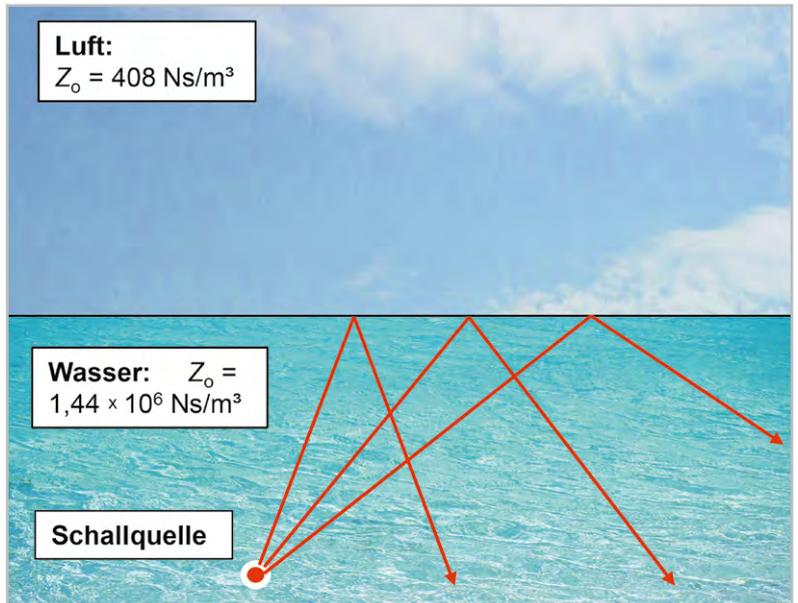


Bild 7: Schallquelle unter Wasser: Alle von ihr ausgehenden Schallstrahlen werden von der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser zur Luft zurückreflektiert (Totalreflexion). Oberhalb der Wasseroberfläche hört man nichts!

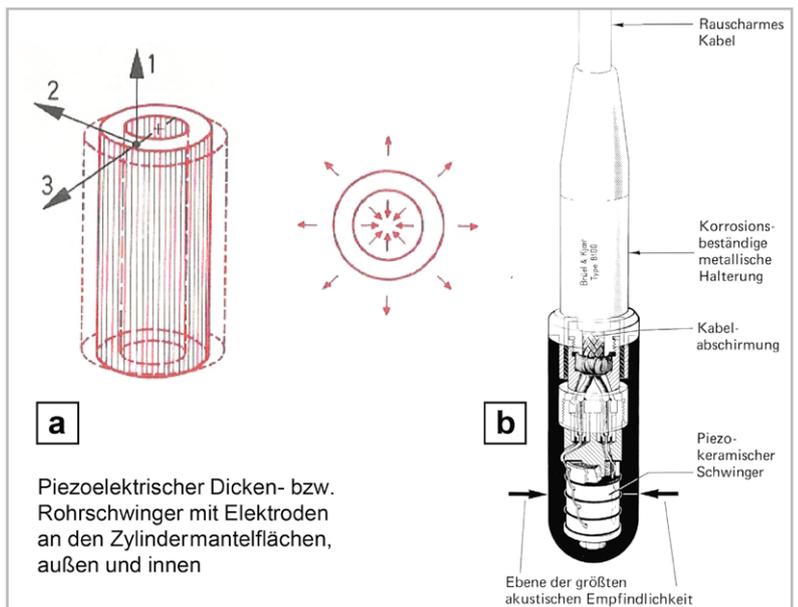


Bild 8: Piezokeramischer Wasserschallempfänger (Hydrofon)
 a) Rohrschwingertyp, mechanisch schwingend in radialer Richtung
 b) Beispiel für den konstruktiven Aufbau eines Hydrofons (Brüel & Kjaer), Länge: 12 cm, Durchmesser: 2,1 cm. Rohrschwingertyp, bestehend aus vier Einzelelementen, die elektrisch parallel geschaltet und mechanisch zu einem Hohlzylinder zusammengesetzt sind. Richtcharakteristik: Omnidirektional. Frequenzgang: linear bis weit über 100 kHz hinaus, verwendbar bis zu einer Meerestiefe von ≥ 1000 m

verstärker zugeführt werden. Letztere Variante wird für Messzwecke bevorzugt verwendet, da man damit unabhängig ist von Leitungslänge zwischen Hydrofon und Messverstärker.

Das Wandlerelement des Hydrofons ist im Allgemeinen mit Neopren wasserdicht umhüllt. Das Material Neopren hat das gleiche Z_0 wie Wasser und ist somit schalltransparent. Nun wird es vom Messen allein nicht leiser, sondern es müssen Maßnahmen getroffen werden, um die hohen Wasserschallpegel, die während des Rammvorgangs um den jeweiligen Pfahl herum auftreten, zu reduzieren. Eine der bekanntesten und wirksamsten Maßnahmen dafür ist die Erzeugung eines während des Rammvorgangs um den Pfahl herum und vom Meeresboden her aufsteigenden Luftblasenvorhangs (Bild 9). So ein Blasenschleier wirkt wie eine schalldämmende Wand. Bei Bedarf werden auch mehrere Blasenschleier erzeugt. Man erkennt das oben auf der Wasseroberfläche



Bild 10: Unterwasserschallschutz mithilfe eines Luftblasenschleiers oder -vorhangs, der den Offshore-Pfahl während der Rammarbeiten umgibt und so die Unterwasserwelt mit ihren Lebewesen vor schädlichem Lärm schützen soll

an der Anzahl der aufgestiegenen, runden Blasenringe. Bild 10 zeigt ein Beispiel, wo man deutlich einen Blasenring auf der Meeresoberfläche erkennt.

Jetzt möchte man aber auch wissen, wie groß der Wasserschallpegel außerhalb des Blasenringes maximal sein darf, damit der Baulärm bei den im Wasser lebenden Säugetieren – z. B. Seehunde, Schweinswale oder Kegelroben – keinen bleibenden Schaden hinterlässt bzw. Schäden nach dem heutigen Wissensstand ausgeschlossen werden können. Dafür gibt es vom Umweltbundesamt (UBA 2011) inzwischen empfohlene Richtwerte [9]. Danach soll der Schalldruckpegel (SEL) für das Einzelereignis in einer Entfernung von 750 m von der Schallquelle, d. h. vom Rammvorgang, einen Wert von 160 dB (re 1 μPa) nicht überschreiten. Dieser Wert erscheint im ersten Augenblick sehr hoch, aber man muss wissen, dass die Pegeldefinition bei Wasserschall sich auf einen Wert von 1 μPa bezieht; für Luftschall dagegen beträgt dieser Bezugswert 20 μPa [10], [11].

Ohne Schallschutzmaßnahmen kann in 750 m Entfernung, je nach aufgewandter Rammenergie und je nach verwendetem Pfahldurchmesser, ein Schalldruckpegel in Höhe von 180 dB und höher entstehen. Der Spitzenschalldruckpegel SPL peak seinerseits soll unter den genannten Bedingungen einen Wert von 190 dB nicht überschreiten, um Schäden, zum Beispiel bei Schweinswalen, nach dem heutigen Wissensstand auszuschließen. Die Einhaltung dieser Werte soll durch Messungen belegt werden.

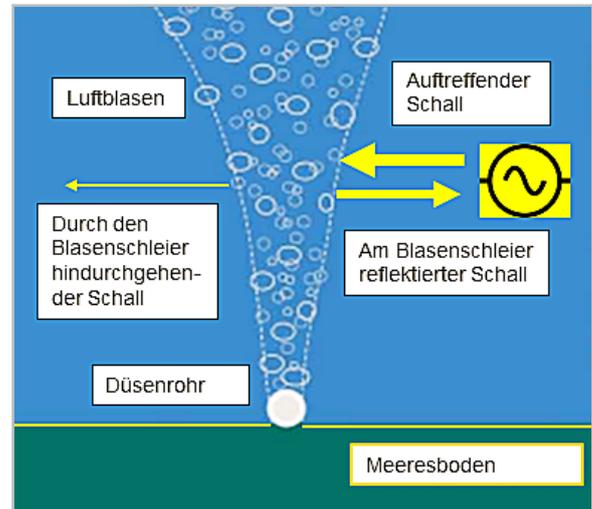


Bild 11: Veranschaulichung eines vom Meeresboden aufsteigenden Blasenringes, an dem seitlich auftreffender Schall zu einem großen Teil reflektiert wird und nur ein deutlich geringerer Teil hindurchgeht (Grafik: Bundesamt für Naturschutz und Autor)

Zusammenfassung

Wir haben gezeigt, wie hoch bei Windkraftanlagen, die auf dem Land stehen (Onshore-Anlagen) z. B. Infraschallpegel sein müssten, um eine Gefährdung für unser Gehör zu bedeuten. Nach unserem heutigen Wissensstand ist nicht davon auszugehen, dass die von solchen Anlagen ausgehenden Pegelwerte derart hohe Werte erreichen, dass sie uns schaden könnten. Interessant ist aber dennoch, dass einige unserer wichtigen Körperorgane mechanische Eigenfrequenzen besitzen, die genau in dem Infraschallbereich liegen.

Bei Offshore-Anlagen und deren Errichtung im Meer bestehen für viele maritime Säugetiere Gefahren. Allerdings gibt es ein Verfahren, das heute generell zur Anwendung kommt und das Meeresbewohner wie Seehunde, Schweinswale oder Kegelroben während der Rammarbeiten ausreichend schützt, nämlich den Blasenring (Bild 11).

Bei Onshore-Anlagen handelt es sich um Luftschall, bei Offshore-Anlagen um Wasserschall. **ELV**

i Weitere Infos

- [1] Veit, I.: „Das Phänomen Infraschall“, Hörakustik 11/2009, S. 8-13
- [2] Veit, I.: „Infraschall und Ultraschall“, ELVjournal 4/2021
- [3] Betke, K. und Remmers, H.: „Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall“, DAGA 1998
- [4] Borgmann, R.: „Leitfaden für Strahlenschutz – Infraschall“. Fachverband für Strahlenschutz e. V., 2005
- [5] ISO 226 (2003), „Infraschall-Wahrnehmungsschwelle für Luftschall“
- [6] Krahé, D.: „Tieffrequenter Schall und Infraschall“, ALD-Information, 2020
- [7] Herr, C. und Brenner, B.: „Macht Infraschall krank?“ Bayerisches Landesamt für Gesundheit, 2012
- [8] Klein, L., Koschinski, S., Lüchmann, K. und Stöcker, U.: „Zwischen Naturschutz und Energiewende: Herausforderung Schallschutz beim Bau von Offshore-Windparks“, Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skript 366, 2014
- [9] Information Unterwasserlärm, Umweltbundesamt (UBA, 2011), „Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen – OWEA“
- [10] Veit, I.: „Flüssigkeitsschall“, Vogel-Verlag Würzburg, 1979, S. 11 ff.
- [11] Veit, I.: „Technische Akustik“, Vogel-Verlag Würzburg, 1978 (2. Auflage), S. 14 ff.